



**Universidad**  
**Zaragoza**

# Trabajo Fin de Máster

## Aplicación de la interferometría de moteado digital al estudio de sólidos

Autor

José Alberto Lorda Abadías

Director/es

Nieves Andrés Gimeno

María Pilar Arroyo de Grandes

Facultad de Ciencias

2013

## Índice

### **Capítulo 1. Interferometría de moteado digital de una sola longitud de onda.**

1.1 Introducción a la interferometría de moteado digital.	1
1.2 Cálculo de la diferencia de fases entre moteogramas	2
1.3 Relación entre la diferencia de fase y el desplazamiento de un objeto sólido	5

### **Capítulo 2. Aplicación de la interferometría de moteado digital de una sola longitud de onda: Medida de deformaciones en superconductores.**

2.1 Introducción	8
2.2 Descripción del dewar	8
2.3 Registro interferométrico	9
2.4 Registro de moteogramas	10
2.5 Análisis de las medidas	11
2.6 Medida de la deformación en aire	12
2.7 Medida de la deformación en nitrógeno	13
2.8 Conclusiones	16

### **Capítulo 3. Interferometría de moteado digital con dos longitudes de onda.**

3.1 Introducción	17
3.2 Montaje interferométrico de doble longitud de onda	17
3.3 Despliegue de la fase con dos longitudes de onda	19
3.4 Cálculo de magnitudes mediante la longitud de onda efectiva	20
3.5 Medida de cambios de la fase inducidos por la llama de una vela	21
3.6 Medida de formas	22
3.7 Conclusiones	23

<b>Bibliografía</b>	<b>24</b>
---------------------	-----------

# Capítulo 1. Interferometría de moteado digital de una sola longitud de onda.

## 1.1 Introducción a la interferometría de moteado digital.

Si un haz de luz coherente, ilumina una superficie con rugosidad mayor a la longitud de onda, la luz es difundida en forma de motas. Si esta luz difundida, denominada haz objeto, interfiere con una haz de referencia de igual coherencia se obtiene una figura interferométrica conocida como moteograma. Si se utiliza un haz de referencia con fase constante, la fase del moteograma solo cambia cuando cambia la fase del haz objeto. A partir de la diferencia de fase  $\delta$  entre moteogramas se puede determinar cambios de una magnitud de interés.

A la técnica basada en el registro digital de moteogramas se le conoce como interferometría de moteado digital. En la figura 1.1 está descrito el esquema básico de un montaje interferométrico. Un mismo haz láser es dividido en haz de iluminación y haz de referencia, de este modo se garantiza que el haz objeto y el haz de referencia sean coherentes entre sí. El haz de iluminación, paralelo a la dirección  $\hat{u}_1$  (dirección de iluminación), incide sobre una superficie rugosa difusora, la cual en muchas ocasiones es el objeto que se quiere estudiar. El haz difundido por la superficie, en la dirección  $\hat{u}_2$  (dirección de observación), forma el haz objeto y se combina con el haz de referencia. Ambos haces interfieren y la interferencia es registrada y almacenada digitalmente por la cámara CCD.

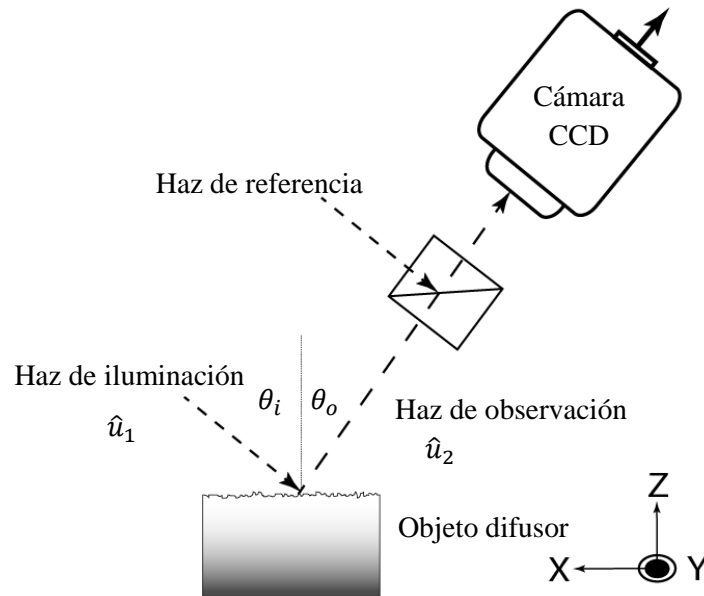


Figura 1.1 Esquema básico de la Interferometría de moteado digital

De la medida de la diferencia de fase  $\delta$  entre un primer moteograma A y un segundo moteograma B, según los casos, se puede determinar diferentes magnitudes: la forma de

objetos, cambios sufridos por los objetos o cambios en el medio por donde se propaga el haz objeto. Describimos brevemente cada caso:

i) *Medida de formas de objetos:*

En la medida de formas, el objeto y el medio no cambian. El haz de iluminación en el moteograma A es distinto que en B. Se utiliza en cada moteograma un haz de iluminación de diferente longitud de onda. La diferencia de fases  $\delta$  entre A y B solo depende de la forma del objeto. A partir de  $\delta$  se determina la forma.

ii) *Medida de cambios en objetos (deformaciones o desplazamientos):*

En la medida de cambios en objetos, el medio por el que se propaga el haz permanece constante. Se utiliza el mismo haz de iluminación para los moteogramas A y B. El estado del objeto es distinto en cada moteograma, dando lugar a que tengan distinta fase. La diferencia de fase  $\delta$  solo depende del cambio sufrido por el objeto. Se aplica para medir giros, desplazamientos micrométricos, deformaciones mecánicas y cambios en la superficie por corrosión.

iii) *Medida de cambios en el medio por el que se propaga el haz objeto.*

En este caso el medio, el medio por el que viaja la onda objeto cambia. Se utiliza el mismo haz de iluminación para los moteogramas A y B. El estado del medio es distinto en cada moteograma, ello da lugar a que tengan distinta fase. La diferencia de fase  $\delta$  depende únicamente del cambio que ha experimentado el medio. Se aplica para medir cambios del índice de refracción, cambios de temperatura y cambios de densidad en medios transparentes.

## 1.2 Cálculo de la diferencia de fase entre dos moteogramas

A continuación se describen matemáticamente las operaciones mediante las cuales se determina la diferencia de fase  $\delta$  entre dos moteogramas.

En cada moteograma se registra la interferencia de la onda objeto y la onda de referencia. Las expresiones complejas de las ondas de referencia y objeto son:

$$A_r(x, y) = a_r(x, y)e^{-i\phi_r(x, y)} \quad (1.1)$$

$$A_o(x, y) = a_o(x, y)e^{-i\phi_o(x, y)}$$

donde  $a_r(x, y)$  y  $a_o(x, y)$  son las amplitudes y  $\phi_r(x, y)$  y  $\phi_o(x, y)$  las fases de las ondas de referencia y objeto. Como las dos ondas son coherentes, la amplitud de la interferencia o moteograma, es la suma de las amplitudes:

$$A(x, y) = A_r(x, y) + A_o(x, y) = a_r(x, y)e^{-i\phi_r(x, y)} + a_o(x, y)e^{-i\phi_o(x, y)} \quad (1.2)$$

La intensidad es:

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |A(x, y)|^2 = A(x, y)A^*(x, y) = \\ &= (a_r(x, y)e^{-i\phi_r(x, y)} + a_o(x, y)e^{-i\phi_o(x, y)})(a_r(x, y)e^{i\phi_r(x, y)} + a_o(x, y)e^{i\phi_o(x, y)}) = \end{aligned} \quad (1.3)$$

$$= |a_r(x,y)|^2 + |a_r(x,y)|^2 + |a_r(x,y)||a_r(x,y)| \cdot (e^{i(\Phi_o(x,y)-\Phi_r(x,y))} + e^{-i(\Phi_o(x,y)-\Phi_r(x,y))})$$

Cuando se registra el segundo moteograma, la fase del haz objeto ha cambiado una cantidad  $\delta$ . Si los cambios en el haz objeto son pequeños podemos suponer que la amplitud de la onda objeto permanecerá también constante y sólo cambiará su fase.

$$a'_o(x,y) \approx a_o(x,y) \quad (1.4)$$

$$\Phi'_o(x,y) = \Phi_o(x,y) + \delta(x,y)$$

Y por lo tanto la intensidad del segundo moteograma es:

$$I'(x,y) = |a_r(x,y)|^2 + |a_r(x,y)|^2 + |a_r(x,y)||a_r(x,y)| \cdot (e^{i(\Phi_o(x,y)+\delta(x,y)-\Phi_r(x,y))} + e^{-i(\Phi_o(x,y)+\delta(x,y)-\Phi_r(x,y))}) \quad (1.5)$$

Al restar pixel a pixel las intensidades entre los dos moteogramas, se obtiene un nuevo moteograma conocido como moteograma de correlación. Su expresión matemática es la siguiente:

$$|I'(x,y) - I(x,y)|^2 = |M(x,y)|^2 \left( \frac{1 - \cos \delta(x,y)}{2} \right) \quad (1.6)$$

Según 1.6 el moteograma de correlación está constituido por el producto de dos términos, el primero,  $M$ , es un factor aleatorio proveniente del fondo del moteado y el segundo término es un coseno en cuyo argumento aparece la diferencia de fase  $\delta$ . El aspecto del moteograma es un conjunto de franjas cosenoidales, con máximos en  $\delta = (2n + 1)\pi$  y mínimos en  $\delta = 2n\pi$ . Contando número de máximos o mínimos se puede obtener las diferencias de fases, y una vez hecho esto relacionarlas con la forma, el cambio del objeto o del medio. Debido al factor  $M$ , la distribución cosenoidal aparece enmascarada y no resulta fácil determinar con exactitud los máximos y mínimos del moteograma. Debido a esto, este procedimiento no es el más adecuado si se pretende calcular la diferencia de fase con precisión.

Para calcular la diferencia de fase con mayor precisión se introducen las técnicas de desplazamiento de la fase, que pueden ser temporal, TPS (Temporal Phase Shifting), o espacial, SPS (Spatial Phase Shifting). En este trabajo se ha empleado el SPS debido a que los objetos que se estudian cambian en el tiempo. Aplicando estas técnicas se obtiene directamente el valor de la fase en cada punto del moteograma. La técnica consiste en introducir un desfase adicional  $f_0$  entre el haz objeto y el haz de referencia, de este modo la intensidad de los moteogramas es:

$$I(x,y) = |a_r(x,y)|^2 + |a_r(x,y)|^2 + |a_r(x,y)||a_r(x,y)| \cdot (e^{i(\Phi_o(x,y)-\Phi_r(x,y)+f_0)} + e^{-i(\Phi_o(x,y)-\Phi_r(x,y)+f_0)}) \quad (1.7)$$

Para introducir el desfase  $f_0$ , se desplaza el foco del haz de referencia con respecto al foco del haz objeto. Para ello se desplaza el centro del haz de referencia horizontalmente una distancia  $r$  respecto al centro de la apertura de la lente formadora de la imagen (figura 1.2 a). El desplazamiento debe ser tal que en cada mota aparezca un desplazamiento de  $2\pi$ . La transformada de Fourier de este moteograma con SPS se muestra en la figura 1.2 b). Esta transformada tiene tres partes, el término central corresponde al haz de referencia. Los otros dos términos provienen de la interferencia del haz objeto y haz de referencia y se encuentran desplazados simétricamente respecto al centro en  $f_0$  y  $-f_0$ . Ambos son conjugados y tienen la

forma de la apertura. La información que contiene uno de estos máximos es  $e^{i(\phi_0 - \phi_r)}$  y su conjugado de  $e^{-i(\phi_0 - \phi_r)}$ . Para determinar el desfase  $\delta$  se selecciona en la Transformada de Fourier el máximo  $f_0$ , se desplaza al centro y se calcula la transformada de Fourier Inversa. De esta forma obtenemos directamente su fase:

En el primer moteograma:  $\phi_0 - \phi_r$  (1.8)

En el segundo moteograma:  $\phi'_0 - \phi_r = \phi_0 - \phi_r + \delta$

Restando pixel a pixel la fase del primero menos la del segundo, obtenemos un mapa del valor de  $\delta$  en cada punto. A este mapa se le conoce como mapa de diferencia de fase.

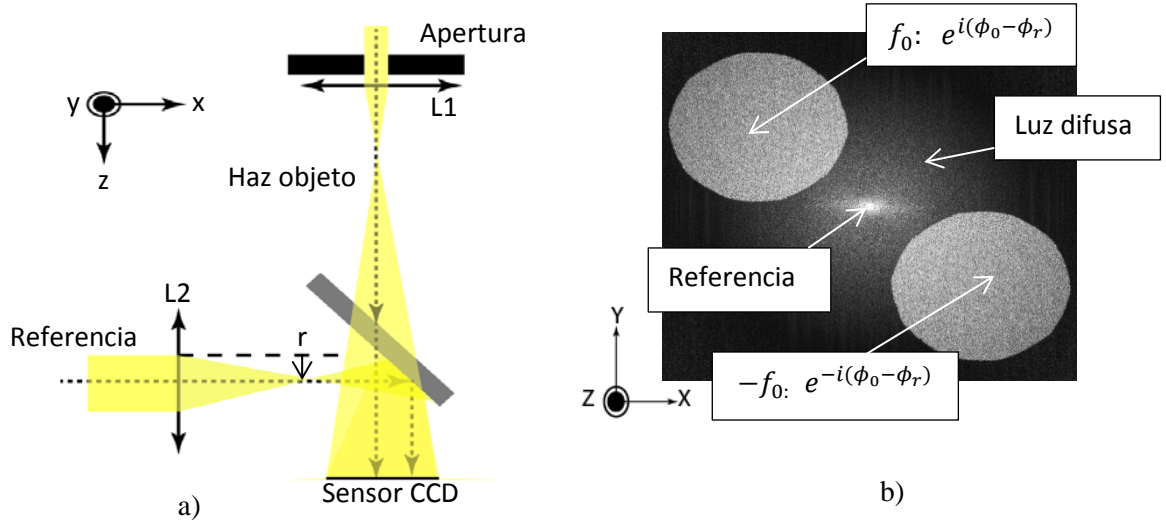


Figura 1.2. a) Esquema del registro con desplazamiento espacial de la fase (SPS). b) transformada de Fourier del moteograma

En el mapa de fase a cada intervalo  $\delta = 2\pi$  se le asocia una escala de grises que va desde el negro hasta el blanco (figura 1.3 a), a dicho intervalo se le conoce como franja. Visualizando el mapa de fases (figura 1.3 b) se obtiene rápidamente información de cómo varía el desfase  $\delta$  a lo largo de todo el mapa. Las técnicas interferométricas introducen un desfase global y para obtener el valor absoluto del desfase  $\delta$  en un punto P, es preciso tener una zona sin deformación que sirva de referencia.

Cabe destacar que aplicar la técnica SPS mejora la calidad de los mapas de fase. Ello es debido a que en el plano de Fourier se elimina toda la luz que no corresponde a la interferencia entre el haz objeto y el de referencia, mejorando el cociente señal/ruido. Además, como veremos en el capítulo 3, el SPS permite registrar varios moteogramas a la vez si a cada uno se le introduce un desplazamiento de la fase diferente. Esto es muy importante en las medidas de formas de objetos en movimientos o medidas de cambios en un medio.

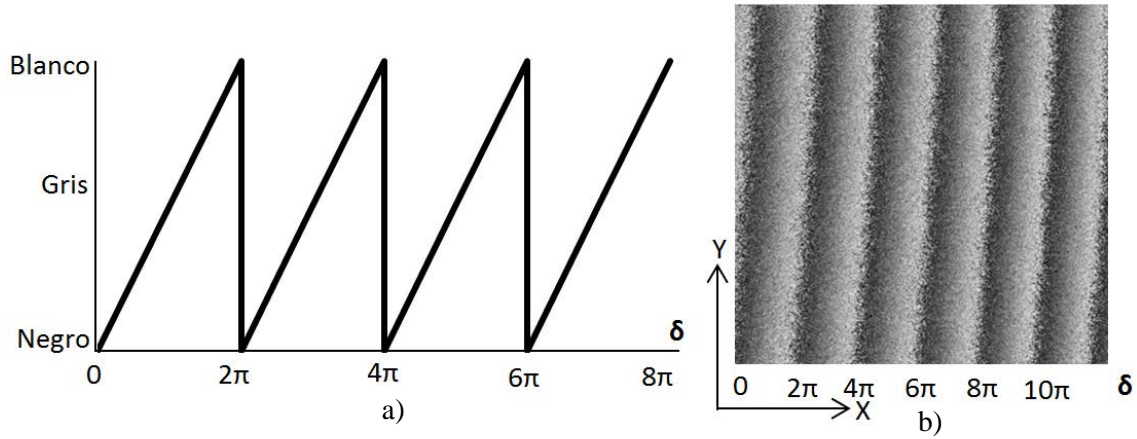


Figura 1.3 Variación de la fase y ejemplo de mapa de fase que corresponde a la rotación en el eje X de un objeto plano.

Para obtener información a partir de la fase, es preciso que esta sea una magnitud continua. Para ello, se realiza un proceso de unwrapping (despliegue) de la fase. Para ello, comparando el nivel de gris entre vecinos, se detectan los saltos  $2\pi$  en la fase obteniéndose el orden de cada franja.

### 1.3 Relación entre la diferencia de fase y el desplazamiento de un objeto sólido.

Una vez obtenida la diferencia de fase entre los moteogramas registrados hay que relacionarla con la magnitud que se va a medir. Una de las aplicaciones más utilizadas es la determinación del desplazamiento o de la deformación en un sólido. A continuación demostraremos la relación entre la diferencia de fase  $\delta$  y la deformación de un objeto. Para el análisis supondremos simultáneos el punto original y deformado.

El objeto es iluminado por un haz divergente proveniente de una fuente de luz y a la cámara CCD le llega su luz difundida, la luz del haz objeto que proviene del punto P. La fase de este haz antes de que se produzca la deformación puede expresarse:

$$\phi_0 = \vec{K}_1 \vec{r}_1 + \vec{K}_2 \vec{r}_2 \quad (1.9)$$

Donde  $\vec{K}_1$  y  $\vec{K}_2$  son los vectores de iluminación y observación, ambos de módulo  $\frac{2\pi}{\lambda}n$  y paralelos a los vectores unitarios  $\hat{u}_1$  y  $\hat{u}_2$  tal y como muestra en la figura 1.4.  $\vec{r}_1$  y  $\vec{r}_2$  son los vectores desplazamiento de los haces de iluminación y observación.

Tras la deformación  $\vec{L}$  del objeto, el punto P pasa a la posición P'. Ahora la fase del haz objeto es:

$$\phi'_0 = \vec{K}'_1 \vec{r}'_1 + \vec{K}'_2 \vec{r}'_2 \quad (1.10)$$

La diferencia de fase entre los haces objeto es:

$$\delta = \phi'_0 - \phi_0 = \vec{K}'_1 \vec{r}'_1 + \vec{K}'_2 \vec{r}'_2 - (\vec{K}_1 \vec{r}_1 + \vec{K}_2 \vec{r}_2) \quad (1.11)$$

La relación entre los vectores desplazamiento es:

$$\begin{aligned}\vec{r}'_1 &= \vec{r}_1 + \vec{L} \\ \vec{r}'_2 &= \vec{r}_2 + \vec{L}\end{aligned}\quad (1.12)$$

Y la expresión (1.11) queda:

$$\delta = (\vec{K}'_1 - \vec{K}_1) \vec{r}_1 + \vec{K}'_1 \vec{L} + (\vec{K}'_2 - \vec{K}_2) \vec{r}_2 - \vec{K}_2 \vec{L} \quad (1.13)$$

Si se considera que el índice de refracción del medio permanece constante, el módulo de los vectores de iluminación y observación permanecen también constantes. Por otro lado si la deformación sufrida en el objeto es pequeña, las direcciones de los vectores de iluminación y observación apenas cambian. En definitiva puede asumirse que los vectores de iluminación y observación permanecen constantes:

$$\begin{aligned}\vec{K}'_1 &\approx \vec{K}_1 \\ \vec{K}'_2 &\approx \vec{K}_2\end{aligned}\quad (1.14)$$

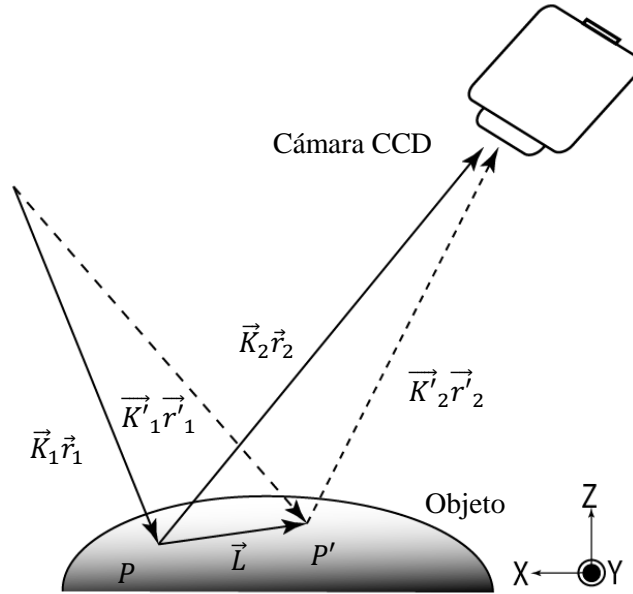


Figura 1.4 Vectores de Iluminación y observación antes y después del cambio.

Así, la expresión 1.13 se reduce a la siguiente:

$$\delta = (\vec{K}_1 - \vec{K}_2) \vec{L} = \vec{K} \vec{L} \quad (1.15)$$

donde al vector  $\vec{K} = \vec{K}_1 - \vec{K}_2$  se le conoce como vector sensibilidad. Según 1.15 a partir de la diferencia de fase  $\delta$  queda determinada la deformación  $\vec{L}$  del objeto. Dependiendo de las



direcciones de iluminación y observación se obtiene un vector de sensibilidad distinto y se determinan unas componentes u otras de  $\vec{L}$ . Si los ángulos de iluminación son  $\theta_i$  y  $\theta_o$  (ver figura 1.1), la diferencia de fase viene dada por:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} [(\sin\theta_o - \sin\theta_i)L_x - (\cos\theta_i + \cos\theta_o)L_z] \quad (1.16)$$

Según 1.16, en una configuración donde los ángulos de iluminación y observación son iguales,  $\theta_i=\theta_o=\theta$ , la diferencia de fase determina únicamente la componente  $L_z$  de la deformación. La precisión será mayor conforme los ángulos sean más pequeños.

$$\Delta L_z = \frac{\lambda}{2\cos\theta} \quad (1.17)$$

## **Capítulo 2. Aplicación de la interferometría de moteado digital de una sola longitud de onda: Medida de deformaciones en superconductores.**

### **2.1 Introducción.**

En este capítulo se va a presentar un ejemplo de la aplicación de la interferometría de moteado digital de una sola longitud de onda. A partir de los registros interferométricos se va a estudiar la deformación de cintas de material superconductor al hacerles circular una corriente eléctrica. El interés de estas medidas es poder en un futuro aplicar la interferometría de moteado digital para localizar defectos con precisión en muestras superconductoras sin que se destruya la muestra.

El procedimiento de control que se emplea habitualmente para determinar si una cinta superconductora tiene algún defecto consiste en hacer pasar a la cinta por un baño de nitrógeno líquido y aplicar a tramos de 1m un pulso de corriente. A través de la medida del voltaje se determina cuándo transita la muestra. Estos procedimientos permiten detectar defectos cada metro únicamente.

Las medidas interferométricas nos dan información del desplazamiento que sufre la muestra debido a la expansión térmica al hacerle circular una corriente. La interferometría de moteado digital es muy sensible y se detectan desplazamientos del orden de micras. La técnica podría usarse para detectar defectos en zonas pequeñas ya que donde hay defectos la muestra se calienta mucho y se observaría un patrón interferencial completamente distinto de si no hay defecto.

El objetivo en este capítulo es estudiar la viabilidad de la técnica para realizar medidas de las cintas sumergidas en nitrógeno al hacerles circular una corriente y determinar las condiciones óptimas para poder localizar defectos en la muestra.

### **2.2 Descripción del dewar**

Se utiliza por primera vez un dewar como el que aparece descrito en la figura 2.1. En trabajos anteriores se ha utilizado una configuración vertical, pero aparecían muchas turbulencias del nitrógeno líquido que enmascaraban la información de la deformación de la muestra superconductora. En esta nueva geometría, la muestra superconductora es refrigerada en una geometría horizontal. Se utiliza una cámara con la que se puede observar la muestra paralelamente a la superficie del nitrógeno líquido sin que existan turbulencias ya que está sumergida en el nitrógeno y por tanto no observamos a través de la superficie libre del nitrógeno, que está en constante movimiento. Una ventaja de esta nueva configuración es que las medidas interferométricas pueden ser realizadas a presión atmosférica y pueden empezarse pocos minutos después de haber llenado el dewar.

La muestra está sujeta por sus extremos mediante un sistema de anclaje que impide que se mueva en la direcciones  $\hat{x}$  e  $\hat{y}$ . Los extremos de la cinta están conectados a los contactos eléctricos por los que se aplica los pulsos de corriente eléctrica y se mide el voltaje.

1. Muestra superconductora.
2. Ventana Óptica inferior
3. Cámara de iluminación.
4. Sistema de anclaje.
5. Toma de voltaje.
6. Conectores de Corriente.
7. Ventana óptica superior.
8. Válvula de vacío.
9. Manguera de nitrógeno.
10. Dewar.
11. Nivel del nitrógeno.



El montaje interferométrico se describe en la figura 2.2. Se utiliza un láser continuo bombeado por diodo, de longitud de onda de 561.6 nm y una potencia de salida de 312 mW. El haz láser es dividido en haz de referencia y haz de iluminación. El haz de iluminación incide sobre el espejo objeto y es reflejado hacia abajo en la dirección  $\hat{z}$ , donde está situado el dewar. El haz láser atraviesa el interior de la cámara de iluminación e ilumina la muestra. Desde la ventana óptica hasta la muestra superconductora, si está sumergida, el haz tiene que atravesar una capa de nitrógeno de espesor  $h$  (del orden de 4 mm) que refrigera la muestra. La luz difundida por el objeto se dirige hacia el espejo objeto y es reflejada en la dirección de observación. El haz objeto se combina con el haz de referencia mediante un cubo divisor de haz y da lugar al moteograma que se registra en la cámara CCD.

9

Para obtener mapas de fase con la mayor calidad posible es importante conseguir una iluminación del objeto lo más homogénea posible. También es importante controlar la relación de luz entre los haces objeto y referencia, para ello se utiliza un filtro en la referencia mediante el cual se puede dejar pasar mayor o menor intensidad. En nuestro montaje interferométrico el ángulo de iluminación es  $\theta_i = 15^\circ$  y el ángulo de observación es  $\theta_o = 0$ . Teniendo en cuenta la expresión 1.16, la diferencia de fase entre dos moteogramas viene dada por:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} [(-\sin\theta_i)L_x - (\cos\theta_i + 1)L_z] \quad (2.1)$$

Como en nuestro caso las componentes  $L_x$  y  $L_y$  de la deformación siempre son cero, la expresión 2.1 se reduce a:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} [-(\cos\theta_i + 1)L_z] \quad (2.2)$$

La precisión en la determinación de la deformación está relacionada con la geometría de registro a través del ángulo de iluminación  $\theta_i$ . En nuestro caso, cada franja equivale a un desplazamiento de 0.24 micras.

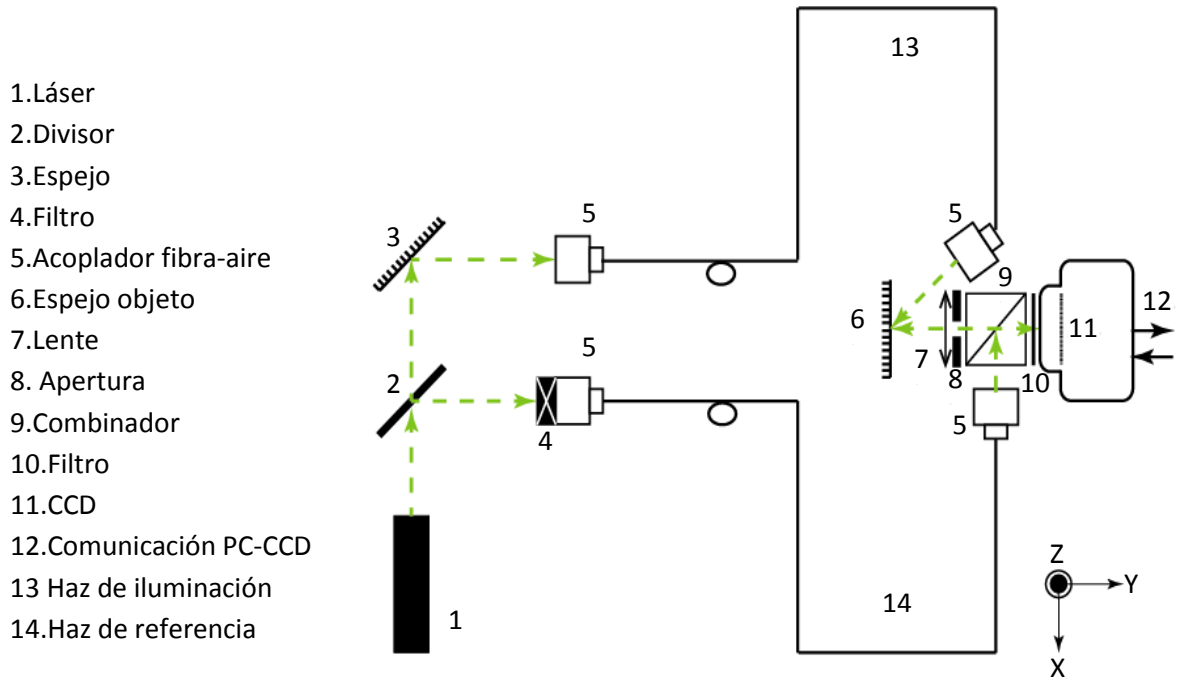
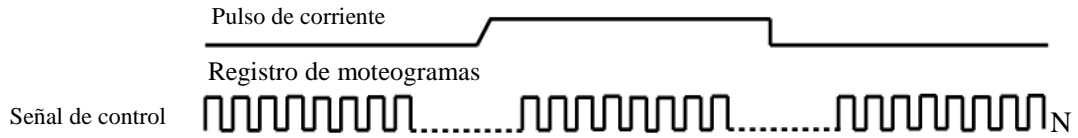


Figura 2.2 Esquema del sistema interferométrico

## 2.4 Registro de los moteogramas.

La adquisición de medidas es controlada en todo momento por ordenador mediante una señal de control. En cada medida se registran moteogramas a la vez que se adquieren valores de voltaje y corriente eléctrica que atraviesa la muestra. De este modo, cada moteograma tiene asociado un valor de voltaje y corriente eléctrica. En la figura 2.3 aparece un esquema de la sincronización de las medidas. Mediante la señal de control se ajusta el tiempo en que la cámara

está abierta (tiempo alto de los pulso de la señal de control), el tiempo en el que está cerrada (tiempo bajo de los pulsos de la señal de control) y tiempo entre imágenes (periodo de la señal de control), relacionado con la velocidad de registro. En cada serie se registran 400 moteogramas con un tiempo de exposición de 2 ms. Se adquieren valores del voltaje y corriente de la muestra, antes, durante y después del pulso de corriente. De este modo se obtiene información del estado inicial de la muestra, de cómo se deforma al aplicar el pulso de corriente y de cómo recupera su estado inicial tras el pulso.



*Figura 2.3 Descripción temporal del registro.*

La deformación máxima que podemos determinar está limitada por el número de franjas que pueden resolverse en los mapas de fase. Si la deformación entre dos moteogramas es muy grande, aparecerán un elevado número de franjas muy juntas entre sí y no se podrán resolver. Para evitar esto, se intenta que la deformación entre dos moteogramas consecutivos sea pequeña. Conforme el valor del pulso eléctrico aplicado es mayor, hay que aumentar la velocidad de registro, disminuyendo el tiempo entre imágenes. En nuestros experimentos se han registrado imágenes cada 15 ms.

## 2.5 Análisis de las medidas.

Para determinar la diferencia de fase en un instante determinado  $t_m$  con respecto a otro  $t_0$ , se calcula la diferencia de fase entre los moteogramas correspondientes a esos instantes o si la deformación es muy grande y no se puede resolver las franjas se puede calcular como la suma de la deformación obtenida al comparar moteogramas registrados consecutivamente, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\delta = \phi_m - \phi_0 = \sum_{i=0}^{m-1} \phi_{i+1} - \phi_i \quad (2.5)$$

Generalmente  $t_0$  es el instante de tiempo en el que se registra el primer moteograma, de este modo se calcula la deformación de la muestra con respecto al estado inicial.

Para calcular la deformación entre dos instantes de tiempo, el mapa de fase (figura 2.4 a) ha de filtrarse para eliminar el ruido de alta frecuencia relacionado con el moteado (figura 2.4 b). Después se despliega la fase espacialmente para tener una distribución uniforme de la fase (figura 2.4 c) y se calcula la deformación utilizando la ecuación 2.2. La deformación es representada en líneas de nivel (figura 2.4 d).

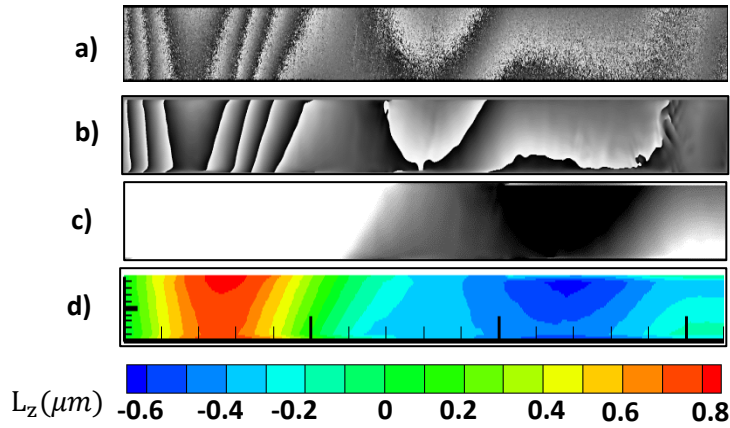


Figura 2.4 a) Mapa de fase, b) Mapa de fase filtrado, c) Mapa de fase desplegado, d) Líneas de nivel  $L_z$ .

## 2.6 Medida de la deformación en aire.

Para comprobar la sensibilidad del sistema interferométrico se han realizado unas medidas de la deformación de la muestra en aire cuando se le aplica un pulso de corriente eléctrica. Se han realizado series de medidas en muestras de 0,1 mm de espesor y anchura de 12 o 4 mm con distintas intensidades. La composición de la muestra es (RE)BCO, Tierra Rara, Bario y Óxido de cobre. A continuación se va a presentar los resultados de deformación obtenidos al introducir un pulso de 3 amperios de 2 segundos de duración en una muestra de 12 mm de anchura. Al no estar refrigerada la muestra no presenta comportamiento superconductor. La figura 2.5 muestra el valor de la corriente que circula por la muestra en cada instante de la medida. En la figura 2.6 se muestran los mapas de fase y las líneas de nivel  $L_z$  de la deformación con respecto al estado inicial. Se observa que inicialmente, antes de aplicar el pulso de corriente, la muestra tiene un movimiento vibratorio que da lugar a una pequeña deformación, con un valor máximo de 0,5  $\mu m$  (figura 2.6 a). Al aplicar el pulso de corriente eléctrica, el voltaje de la muestra permanece constante en 2,3 Voltios. Mientras la corriente circula, la muestra se deforma cada vez más y siempre en mayor medida por la parte central. La deformación corresponde a un pandeo de la muestra, midiéndose una deformación máxima en el centro de 4,5  $\mu m$ , correspondiendo con el final del pulso de corriente. Una vez finalizado el pulso, se observa como la muestra va regresando a su estado inicial.

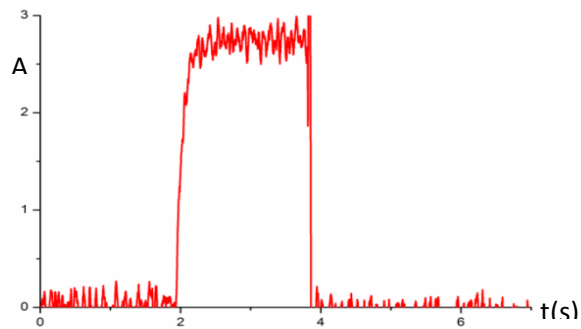


Figura 2.5 Evolución temporal del pulso de corriente eléctrica

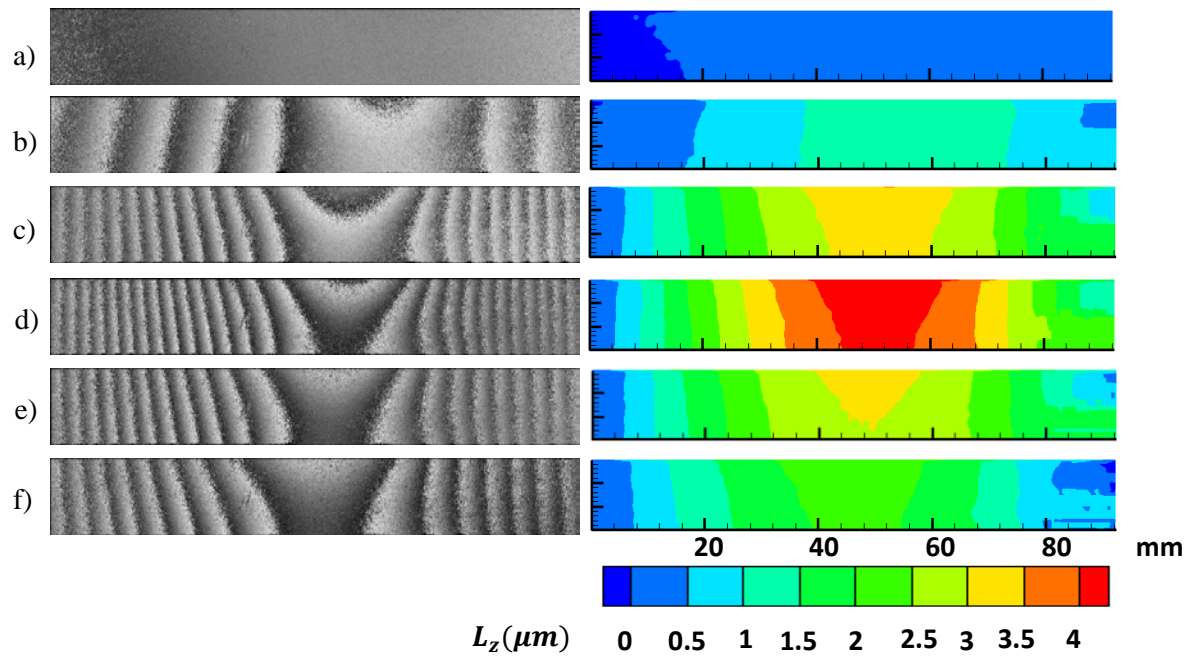


Figura 2.6 Mapas de fase y líneas de nivel  $L_z$  de la deformación en distintos instantes con respecto al estado inicial. Los instantes en segundos son: a) 1.0315, b) 2.515, c) 3.415, d) 4.015, e) 5.215 y f) 6.715.

## 2.7 Medidas de la deformación en nitrógeno.

A continuación se muestran los resultados obtenidos con la muestra sumergida en nitrógeno con una altura  $h$  entre la muestra y la ventana óptica de mm.

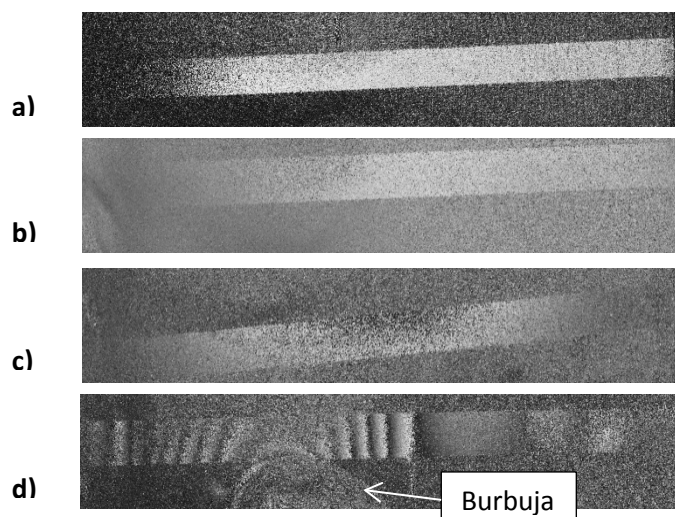
Se ha observado que la muestra sufre deformación antes de aplicar el pulso de corriente que es incluso oscilante en algunos casos. Este efecto tiene como origen por un lado el calentamiento de la muestra debido a la energía del haz laser y por otro el sistema de anclaje. Para minimizar los efectos del láser se coloca un obturador sincronizado con la cámara de registro. Así, el haz de iluminación tan sólo ilumina a la muestra durante el tiempo de exposición de la cámara. Respecto al sistema de anclaje se ha intentado tensar al máximo la muestra, comprobándose que en aire disminuye el movimiento al pulso de corriente. En nitrógeno no es evidente la mejora debido a la distinta conductividad térmica de las distintas capas del material superconductor.

La cantidad de nitrógeno líquido que hay sobre la muestra depende de la altura  $h$ , distancia entre la ventana óptica y la muestra superconductora (figura 2.1). Si  $h$  aumenta, la cantidad de nitrógeno sobre la muestra aumenta y existirá mayor refrigeración, en este caso, la muestra se deforma menos para una determinada corriente eléctrica, en un determinado intervalo de tiempo  $\Delta t$ . Sin embargo disminuir  $h$  también presenta ventajas, para valores de  $h$  menores el haz objeto tiene que atravesar menor espesor de nitrógeno, de modo que el haz objeto contiene menor cantidad de ruido procedente del nitrógeno y como consecuencia el contraste y la nitidez de los mapas de fase mejora.

Por otro lado, la altura  $h$  también juega un papel importante en la posible aparición de burbujas sobre la muestra. En el caso de que  $h$  sea demasiado pequeña, aparecen burbujas, éstas pueden quedar atrapadas de forma permanente entre la ventana óptica y la muestra superconductora, lo cual impide definitivamente las medidas ópticas. Se han realizados medidas

con valores de  $h$  igual a 2, 4 y 6 mm y se ha podido comprobar que la altura más adecuada para las medidas interferométricas corresponde a 4 mm.

En la figura 2.8 aparecen mapas de fase de la muestra, sin aplicar un pulso de corriente eléctrica, correspondientes a distintas situaciones. En a) la muestra está en aire, en b) y c) la muestra está refrigerada con nitrógeno líquido, el valor de la altura  $h$  es de 4 y 6 mm respectivamente. Como se puede observar, la visibilidad es peor que en la medidas en aire e incluso en el centro cuando  $h=6$  mm. En d) la altura  $h$  es de 2 mm, y ha quedado atrapada una burbuja de nitrógeno líquido que deforma a la muestra e impide su visualización.

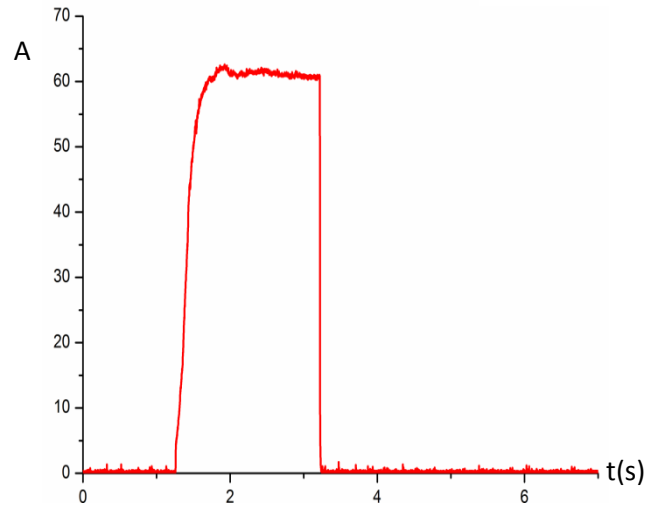


*Figura 2.7 Mapas de fase correspondientes a distintas situaciones. a) Muestra en aire. En b) , c) y d) muestra refrigerada en nitrógeno con una altura  $h$  de 6, 4 y 2 milímetros respectivamente.*

Se observa además que al introducir el pulso de corriente no es posible el registro de los interferogramas, debido al calentamiento de los contactos que da lugar a movimiento del nitrógeno. Ello no nos permite conocer la deformación total de la muestra respecto al instante inicial pero si la deformación producida durante el pulso. Dado que los defectos originarán una figura interferométrica distinta durante el pulso, la técnica nos permitiría detectarlos.

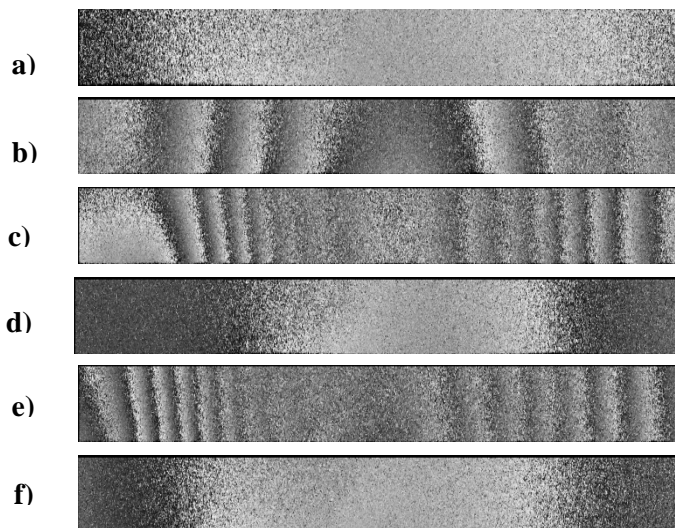
A continuación se muestran los resultados obtenidos con la muestra sumergida en nitrógeno con  $h=4$  mm y aplicando un pulso de corriente de 60 amperios de 2 segundos de duración. El pulso comienza en el instante 1.255 segundos y finaliza en el 3.220 segundos. En la figura 2.8 se muestra el valor de la corriente que circula por la muestra en cada instante. En los mapas de fase se puede observar que la muestra se deforma en la subida del pulso. Mientras está aplicada la corriente, la deformación es constante. Cuando finaliza, la muestra vuelve a recuperar el estado inicial. Durante la subida del pulso, entre los instantes de tiempo 1.405 y 1.525 y en la bajada entre los instantes de tiempo 3.250 segundos y 3.355 segundos, los mapas de fase no se resuelven. Debido a ello no podemos determinar el valor de la deformación que adquiere la muestra con respecto al instante inicial. Debemos limitarnos a determinar la deformación en cada instante comparando con el moteograma anterior.



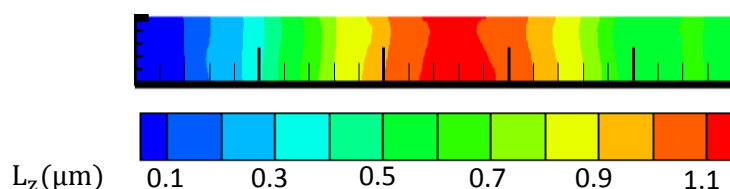


*Figura 2.8 Evolución temporal de la corriente eléctrica circulando por la muestra*

En la figura 2.9 se muestran algunos mapas de fase. La figura 2.9 a) corresponde a instantes de tiempo anteriores a la aplicación del pulso de corriente. Se observa que la muestra presenta fase constante, lo cual indica que no sufre cambios con respecto al instante anterior. Los mapas de fase de la figura b) y c) corresponden a instantes tras la aplicación del pulso y se observa una mayor deformación de la muestra conforme la intensidad aumenta. El mapa de fase en d) corresponde a los instantes en los que el pulso de corriente es constante, la muestra no presenta franjas y ello indica que no se deforma con respecto al estado anterior, es decir, la deformación que ha adquirido en la subida del pulso, se mantiene constante. El mapa de fase en e) corresponde a la bajada del pulso. Debido a que la muestra está recuperando su estado inicial, el sentido de las franjas es contrario a las de los mapas de fase anteriores. Finalmente en f) la muestra, ya estable, aparece de nuevo con fase constante.



*Figura 2.9 Mapas de desfase de la muestra en nitrógeno en distintos instantes de tiempo al comparar con el moteograma anterior. Los instantes de tiempo en segundos correspondientes son: a) 1.150, b) 1.360, c) 1.465, d) 3.010 e) 3.370 y f) 5.110.*



*Figura 2.10 Deformación de la muestra de la imagen c)*

A partir de los mapas de fase se calculan los mapas de desplazamiento de la muestra en cada instante de tiempo. En la figura 2.10 se muestra la componente  $L_z$  de la deformación de la muestra correspondiente al mapa de fase de la figura 2.9 b. En ella la muestra tiene una deformación máxima en su zona central de  $1,1 \mu\text{m}$ . Debido al sistema de anclaje de que disponemos y al calentamiento del nitrógeno al introducir la corriente, no se pueden resolver todos los mapas de fase por lo que la deformación total de la muestra con respecto a la situación inicial con el sistema actual no se puede obtener. En cualquier caso, sí que se puede visualizar la deformación en función del tiempo.

## 2.8 Conclusiones.

En el capítulo se ha realizado una descripción del montaje para medir calentamiento de muestra superconductora, formado por un dewar y un sistema interferométrico. Se ha comprobado la sensibilidad de las medidas interferométricas determinando la deformación de la muestra en aire al paso de un pulso de corriente eléctrica. Las medidas interferométricas determinan en cada instante la deformación de la muestra con respecto al estado inicial y la deformación con respecto al moteograma anterior. Estos valores son contrastados con las medidas sincronizadas de corriente y voltaje de la muestra. Se han optimizado los parámetros del montaje comprobando su influencia en la deformación final de la muestra: anclaje, velocidad de registro, tiempo de exposición, distancia entre la ventana y la muestra...etc

Debido a que al aplicar el pulso de corriente eléctrica, los contactos de cobre se calientan dando lugar a evaporación y movimiento del nitrógeno, no se puede medir la deformación total respecto al inicio del pulso pero si podemos determinar de forma cuantitativa la deformación durante el pulso. Dado que la deformación es alta en algunos momentos la deformación ha de medirse como suma de la deformación entre imágenes registradas de forma consecutiva.

La precisión de la medidas de la fase en cada mapa de diferencia de fase de SPS es de franja /100 y cuando se calcula sumando pequeñas deformaciones el error aumenta siendo la desviación estándar el doble de cuando lo calculamos directamente entre dos instantes de tiempo. Además de la medida de la deformación en cada instante, la técnica nos permite observar la evolución temporal de la deformación.

## Capítulo 3. Interferometría de moteado digital con dos longitudes de onda.

### 3.1 Introducción del capítulo.

Este capítulo está dedicado a la interferometría de doble longitud de onda. La interferometría de doble longitud de onda amplía las posibilidades de la interferometría convencional. Permite seguir un proceso de unwrapping (despliegue de la fase) distinto al descrito en el capítulo 1 y permite realizar medidas de magnitudes a partir de una longitud de onda efectiva.

Se utiliza un montaje interferométrico de doble longitud de onda, que permite registrar, según convenga, uno o dos moteogramas a la vez. Este montaje interferométrico se va aplicar en dos tipos de medidas. En primer lugar se aplica en la medida de cambios en la fase que producen los cambios de densidad inducidos por la llama de una vela. Para este caso se emplean dos longitudes de onda diferenciadas en varias decenas de nanómetros. En segundo lugar, el montaje se aplica a la medida de formas de objetos sólidos, para este caso las dos longitudes de onda difieren en menos de dos décimas de nanómetro.

### 3.2 Montaje interferométrico de doble longitud de onda.

En la figura 3.1 se describe el montaje interferométrico de doble longitud de onda. Se utilizan dos láseres de longitudes de onda  $\lambda_a$  y  $\lambda_b$ . A su salida, cada haz láser es dividido en haz de referencia y haz de iluminación. Mediante un acoplador de fibra 50-50 la referencia de cada longitud de onda es dividida en dos caminos ópticos de igual intensidad. De este modo cada longitud de onda tiene un haz de iluminación y dos haces de referencia. Cada referencia se

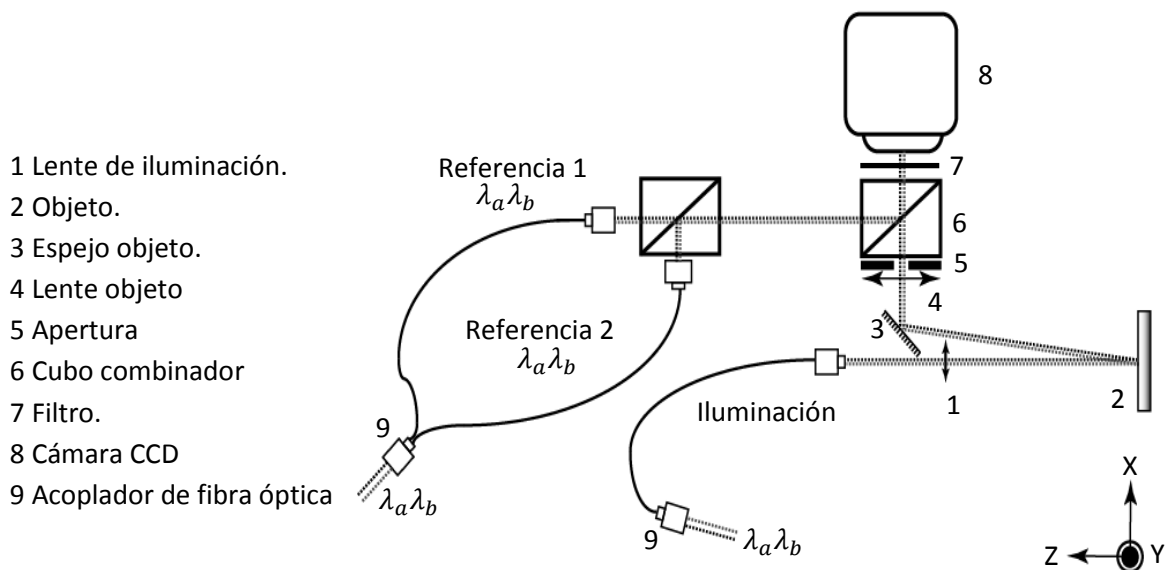


Figura 3.1 Montaje interferométrico de doble longitud de onda.

ajusta con un desplazamiento espacial de la fase opuesto. Se utiliza otro acoplador de fibra óptica 50-50 para acoplar a los dos haces de iluminación y conseguir que tengan exactamente el mismo camino óptico. La dirección de iluminación es perpendicular al objeto y la dirección de observación forma un ángulo de 3,8 grados con el eje óptico. Para ajustar la relación de intensidad entre el haz objeto y el de referencia, se emplea un filtro con el que podemos regular la intensidad de la referencia. La cámara CCD tiene las mismas características que en el capítulo 2. Delante de la cámara se coloca un filtro que sólo deja pasar la luz polarizada del objeto y de la referencia y elimina el resto de luz difusa proveniente de otros sitios.

El montaje interferométrico anterior tiene dos modos de registro:

### Modo A

Las dos longitudes de onda tienen la misma referencia. Se registran dos moteogramas por separado (figura 3.2 a) y b), uno para cada longitud de onda. Con este modo sólo es posible determinar formas de objetos sólidos que están quietos.

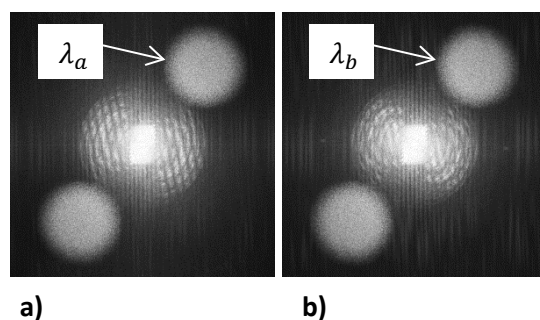


Figura 3.2 Registro de moteogramas con la misma referencia para las dos longitudes de onda.

### Modo B

Cada longitud de onda tiene una referencia distinta. Se registran los dos moteogramas a la vez (figura 3.3 a). Permite automatizar el registro y se puede determinar cambios en el medio y formas de objetos sólidos en movimiento. Al calcular la diferencia de fase entre los dos moteogramas se obtiene un mapa de diferencia de fase con un fondo de franjas hiperbólicas debido a la interferencia entre las dos referencias (figura 3.3 b). Este fondo de franjas puede ser eliminado en gran medida, si en lugar de seleccionar todo el moteograma, se selecciona la zona donde la interferencia de las referencias es constante (figura 3.3 c).

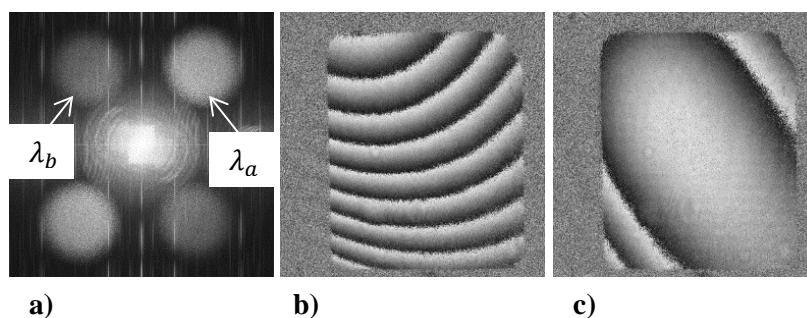


Figura 3.3 Registro de moteogramas con distinta referencia para cada longitud de onda.

### 3.3 Despliegue de la fase con dos longitudes de onda.

Con dos longitudes de onda se puede determinar el desfase  $\delta$  de un modo alternativo al visto en el capítulo 1 (despliegue espacial de la fase). A continuación se detalla el proceso de registro y análisis que hay que seguir en este método : Para cada longitud de onda se registra un moteograma del estado inicial y otro del estado final. Al calcular los mapas de diferencia de fases correspondientes a cada longitud de onda, para la de mayor valor, aparecen franjas más anchas y por lo tanto menor número (Figura 3.4 a y b). Después se crea una imagen de color de dos canales  $a$  y  $b$ , a dicha imagen se le denomina mapa de orden. En el mapa de orden, el punto genérico  $P$  tiene una intensidad  $a$  igual a la intensidad de gris que tiene en el mapa de fases  $\lambda_a$ , análogamente, la intensidad  $b$  en  $P$  será la intensidad de gris que tiene en el mapa de fases  $\lambda_b$ . Por lo tanto cada punto del mapa de orden tiene una tonalidad única y distinguible. Cuando un mismo punto es un máximo de intensidad en los mapas de fase  $\lambda_a$  y  $\lambda_b$ , en el mapa de orden, dicho punto corresponde al orden cero, desfase  $\delta=0$ . Si se utilizaran tres longitudes de onda, el mapa de fases de orden estaría constituido por tres canales y los puntos con  $\delta=0$  serían de color blanco (figura 3.4 d). En nuestro caso, con dos longitudes de onda, solo podemos definir dos canales, verde y azul, los puntos  $\delta=0$  tienen una tonalidad mezcla de verde y azul determinada (figura 3.4 c). La ventaja que presenta este método es que podemos conocer el desfase  $\delta$  en cada punto a partir del color que presenta, sin necesidad de conocer el desfase de sus puntos vecinos. Por ello, a diferencia del método del despliegue de la fase espacial, no es crítico que aparezcan zonas con mal contraste en el mapa de fases. Con este método se tiene un rango de medida del desfase  $\delta$  limitado. Este rango es el periodo de aparición del orden cero  $\delta=0$ . Con dos longitudes de onda, el rango de medida es:

$$\text{Rango de medida} = \frac{\lambda_a}{\lambda_b - \lambda_a} \quad (3.1)$$

Con longitudes de onda  $\lambda_a = 457 \text{ nm}$  y  $\lambda_b = 515 \text{ nm}$  el rango de medida es aproximadamente 8, es decir se pueden determinar como máximo 8 saltos de  $2\pi$ . En la figura 3.4 c) se puede observar el periodo de aparición del orden cero con estas dos longitudes de onda.

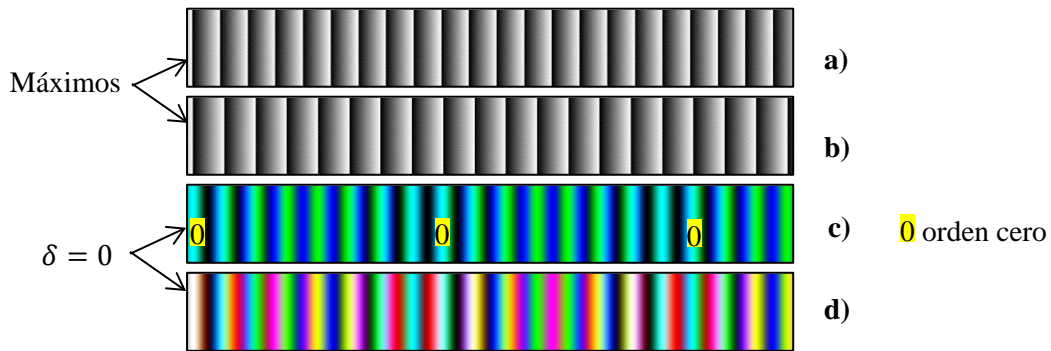


Figura 3.4 a) y b) Simulación de los mapas de diferencia de fase correspondientes a  $\lambda_a$  y  $\lambda_b$ . c) y d) Mapas de orden utilizando dos y tres longitudes de onda.

### 3.4 Cálculo de magnitudes mediante la longitud de onda efectiva

Con dos longitudes de onda se pueden determinar magnitudes mediante una longitud de onda efectiva  $\Lambda$ . Un caso habitual es el de medida de formas:

En la figura 3.5 está descrito el modelo para el cálculo de formas con dos longitudes de onda. El objeto es iluminado con dos longitudes de onda, que siguen el mismo camino óptico. Los vectores de iluminación son  $\vec{K}_{1n}$  y los de observación  $\vec{K}_{2n}$ , todos ellos perpendiculares al objeto y de módulo  $\frac{2\pi}{\lambda_n}$ . El vector  $\vec{r}_1$  tiene la misma dirección y sentido que los vectores de iluminación y módulo igual a la distancia entre los planos P y Q. El vector  $\vec{r}_2$  tiene igual dirección y sentido que los vectores de observación y con módulo igual a la distancia entre los planos P y S.

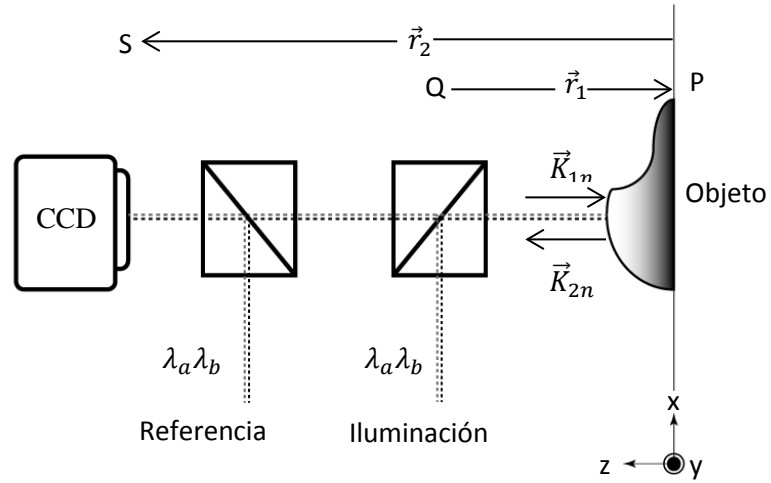


Figura 3.5 Configuración interferométrica para la medida de formas con dos longitudes de onda.

Según el modelo, la fase de la onda objeto de longitud de onda  $\lambda_a$  viene dada por la expresión 3.2:

$$\phi_a = \vec{K}_{1a}(\vec{r}_1 - z(x, y)\hat{u}_z) + \vec{K}_{2a}(\vec{r}_2 - z(x, y)\hat{u}_z) + \phi_{0a} \quad (3.2)$$

Donde  $\phi_{0a}$  es el valor de fondo con el que contribuye el camino óptico que va desde la salida del láser hasta el punto Q. Si desarrollamos la expresión (3.2) se obtiene:

$$\phi_a = K_{1a}r_1 - K_{1a}Z(x, y) + K_{2a}r_2 - K_{2a}Z(x, y) + \phi_{0a} = \frac{-4\pi}{\lambda_a}Z(x, y) + \phi'_{0a} \quad (3.3)$$

Análogamente, la fase de la onda objeto de la longitud de onda  $\lambda_b$  es:

$$\phi_b = \frac{-4\pi}{\lambda_b}Z(x, y) + \phi'_{0b} \quad (3.4)$$

Si se eliminan los valores de fondo  $\phi'_{0a}$  y  $\phi'_{0b}$  y se define la longitud de onda efectiva  $\Lambda$  como:

$$\Lambda = \frac{\lambda_a \lambda_b}{\lambda_a - \lambda_b} \quad (3.5)$$

la diferencia de fases  $\delta$  entre las dos ondas objeto viene dada por:

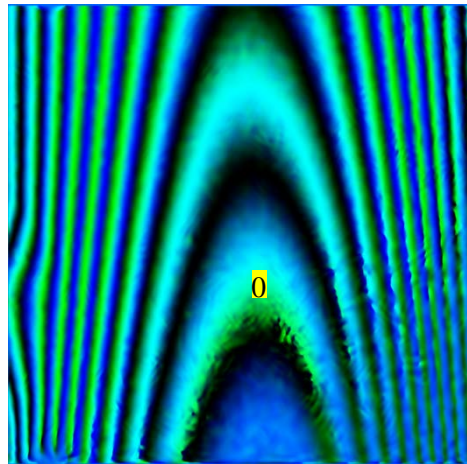
$$\delta = \phi_b - \phi_a = \frac{-4\pi}{\Lambda} Z(x, y) \quad (3.6)$$

Según esta expresión a partir de la diferencia de fases  $\delta$  se puede determinar la forma  $Z(x, y)$  de la superficie del objeto.

### 3.5 Medidas de cambios de la fase inducidos por la llama de una vela

Los cambios de densidad en un medio producen cambios de índice, lo cual a su vez produce diferencia de caminos ópticos. Si tenemos un medio cuya densidad está cambiando constantemente, registrando dos moteogramas, cada uno con un estado distinto del medio, a partir de la diferencia de fase  $\delta$  se puede medir el cambio de densidad sufrido. En este apartado se muestran las medidas del cambio de fase que producen la llama de una vela situada delante de una lámina blanca difusora.

Se utiliza el modo de registro B del montaje interferométrico de la figura 3.1. Las longitudes de onda utilizadas son  $\lambda_a = 457 \text{ nm}$  y  $\lambda_b = 515 \text{ nm}$ . El tiempo de exposición de los moteogramas es de 50 ms. Se han registrado para cada longitud de onda, un moteograma de la lámina difusora sin vela y otro con la llama de la vela delante. Para cada longitud de onda  $\lambda_a$  y  $\lambda_b$  se ha obtenido un mapa de diferencia de fases. Al aplicar el método de despliegue de la fase con dos longitudes de onda se obtiene el mapa de orden de la figura 3.6.



0 orden cero

*Figura 3.6 Mapa de orden de la vela*

El orden cero,  $\delta = 0$ , lo podemos posicionar donde más nos convenga, para ello se resta una fase global en el mapa de orden. Nosotros lo hemos posicionado en la zona central de la llama. En la figura 3.7 se muestra una zona ampliada del mapa de orden. Comparando con el modelo de la figura 3.4 c) obtenemos el orden de cada zona de la vela.

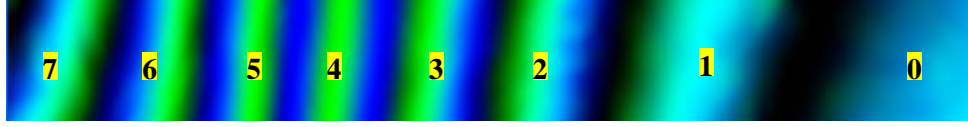


Figura 3.7 Zona ampliada del mapa de orden de la vela donde se indica el orden de cada zona.

### 3.6 Medida de formas

En este apartado se emplea el modo A de registro del montaje interferométrico de la figura 3.1 para determinar formas a partir de la longitud de onda efectiva. Las longitudes de onda empleadas son  $\lambda_a = 659.477 \text{ nm}$  y  $\lambda_b = 659.597 \text{ nm}$ . Dan lugar a una longitud de onda efectiva  $\Lambda = 3.6 \text{ mm}$ . En el mapa de diferencia de fases cada franja representa una línea de nivel  $z(x, y)$  de  $1.8 \text{ mm}$ .

Para comprobar la precisión de las medidas se han registrado moteogramas de un objeto plano posicionado en distintas orientaciones con respecto a la dirección de iluminación. Se registra en primer lugar el objeto orientado a cero grados, y después orientado a 30, 15, -15 y -30. Al comparar los moteogramas de las distintas orientaciones con el orientado a cero grados se obtienen los mapas de diferencia de fases de las figura 3.5.

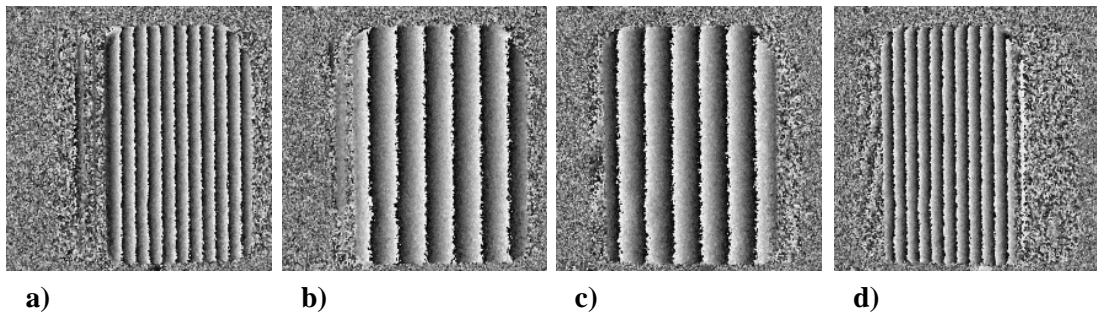


Figura 3.5 Mapas de diferencia de fases del objeto plano orientado con respecto la dirección de iluminación. a) 30 grados, b) 15 grados, c) -15 grados, d) -30 grados.

Teniendo en cuenta que cada franja representa una línea de nivel en  $\hat{z}$ , midiendo con una escala la longitud  $L_N$  en la dirección  $\hat{x}$  que ocupan un número N de franjas, calculamos el ángulo  $\theta$  del objeto en cada caso mediante la siguiente expresión:

$$\theta = \arctg\left(\frac{N \times 1.8}{L_N(\text{mm})}\right) \quad (3.7)$$

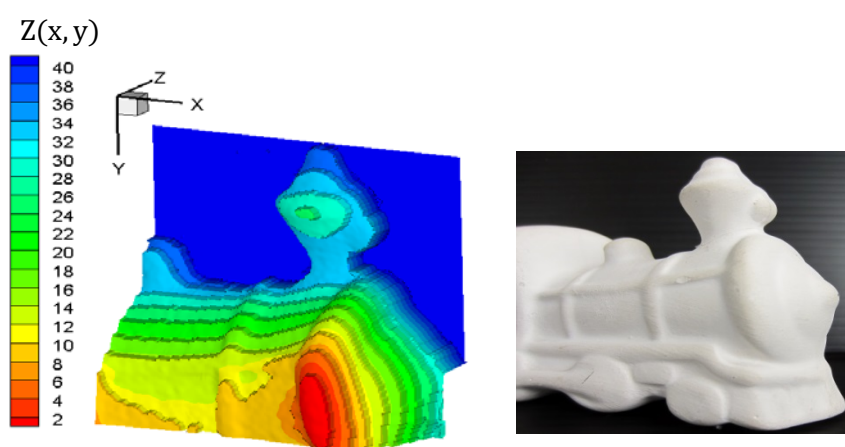


Los resultados son los siguientes:

*Tabla 3.1. Cálculo de las orientaciones del objeto plano.*

Mapa de diferencia de fase	$\theta$ (grados)	Error nominal %
a)	30.1	0.3
b)	15.45	3.5
c)	-15.8	5.3
d)	-31.9	6.3

Finalmente se ha aplicado el montaje interferométrico para medir la forma de una figura de escayola de un tren. En la figura 3.6 aparece la representación de las líneas de nivel junto a la fotografía del tren.



*Figura 3.6 Medida de la forma de un tren de escayola.*

### 3.7 Conclusiones

La interferometría de doble longitud de onda amplía las posibilidades de la interferometría convencional.

Permite desplegar la fase de un modo alternativo. Con este nuevo método se puede determinar la fase en cada punto sin tener en cuenta la de los puntos vecinos, sólo es necesario conocer el color del punto deseado. Ello presenta una ventaja, ya que en este caso se puede determinar el valor del desfase en un punto incluso si los puntos vecinos son defectuosos.

Por otro lado, permite medir magnitudes, como la forma de un objeto, a partir de una longitud de onda efectiva. El error nominal de las medidas es inferior al 10%. Con dos longitudes de onda, los sistemas interferométricos pueden ser usados en un amplio rango de medidas si se eligen adecuadamente las longitudes onda.

En la medida de formas, con dos longitudes de onda, la iluminación puede ser perpendicular a la superficie del objeto. Ello presenta una ventaja frente a la interferometría de una sola longitud de onda donde es necesario iluminar en ángulo, lo cual produce sombras en distintas zonas, en especial en objetos de formas complejas.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **Digital Speckle Pattern Interferometry And Related Techniques.** (Ed. P.K. Rastogi), (Wiley 2001).
2. Sara Recuerdo Ibáñez. **Aplicación de técnicas ópticas para la detección de puntos calientes y procesos de degradación superficial en materiales superconductores cerámicos.** Tesis doctoral
3. Jean-Michel Desse, Pascal Picart and Patrice Tankam. **Digital color holographic applied to fluid and structural mechanics.** Optics and Lasers in Engineering 50. (2012) 18-28.
4. J.M. Desse, P. Picart and P. Tankam. **Digital three-color holographic interferometry devoted to fluid mechanics.**
5. J.M. Desse, P. Picart and P. Tankam. **Digital three-color holographic interferometry for flow analysis.** Optics Express 14 April 2008 / Vol. 16, No. 8 /
6. J.M. Desse, R. Deron **Optical Diagnostics of Flows.** Journal Aerospace Lab. December 2009.
7. Ichirou Yamaguchi, Takashi Ida, Masayuki Yokota, and Kouji Yamashita. **Surface shape measurement by phase-shifting digital holography with a wavelength shift.** Applied Optics, Vol. 45, No. 29, 10 October 2006.